

心電図と心臓動態から考える心臓 CT 撮影技術

高瀬クリニック 放射線部 佐野 始也

【はじめに】

近年、冠動脈CTの被ばく量が高いことが問題視され、様々な対策が講じられてきた。最も効果的な被ばく低減撮影技術はprospective ECG-gated 法で、通常は低心拍数でかつ整脈例においてのみ使用可能とされている。しかし撮影中に全く不整脈に遭遇しないわけではない。冠動脈CTを高画質かつ低被ばくで撮影するには、整脈および不整脈における心臓生理(心電図と心周期の関係)を理解し、CT装置の特性と不整脈制御機能を熟知する必要がある。

【心臓刺激伝導系と心電図の関係】

心臓全体の動作のリズムを決定しているのは「洞結節」で、通常はここがペースメーカーの役割をはたしている。その洞結節から出された電気信号が、次々と下位に伝わることによって各部分を興奮させる。

右心房にある洞結節が興奮し心房筋に伝播すると心房筋が興奮(P波)し収縮が起こる。その興奮は房室結節に伝わるが、この部位の伝導速度は遅く120~200 msecの時間(PQ時間)を必要とする。その後、興奮はHis束、脚、プルキンエ繊維を経て心室筋に伝えられ、心室筋は興奮(QRS波)し収縮する。

この刺激が伝わる一連の経路を「刺激伝導系」という。この心臓の動作の元となっている電気信号を体外から観察したものが心電図で、その波形は心臓の各部分の興奮状態に対応している(Fig.1, Fig.2)。

刺激伝導系を電気的刺激が通過したあと、または心筋が興奮したあとには、新たな電気的刺激を加えても興奮しない一定の期間がある。この期間を不応期といい絶対不応期と相対不応期がある。絶対不応期では、いかなる強い刺激が与えられても、反応が生じない。電気生理学的には、活動電位の始まりから興奮が回復し始めるまでの時期に相当する(Fig.3)。

相対不応期では、通常の刺激よりも比較的強い刺激である場合のみ反応するか、または刺激に対して徐々に反応が生じる。電気生理学的には、絶対不応期の終わりから、拡張期に至り興奮が回復するまでの時期に相当する。

【心臓ポンプ機能と心周期】

心臓はポンプであり、四つの部屋[右心房(RA)、右心室(RV)、左心房(LA)、左心室(LV)]と四つの弁[三尖弁(TV)、肺動脈弁(PAV)、僧帽弁(MV)、大動脈弁(AoV)]で構成されている。各弁は圧力差(圧格差)によって開閉し、圧力は心室筋および心房筋の収縮によって発生する。

左心系について考えると、心周期は大きく収縮期(systole: S)と拡張期(diastole: D)に分けられ、収縮期はさらに等容収縮期(isovolemic contraction phase: IVC)と駆出期(ejection phase: Ej)、拡張期は等容拡張期(isovolemic relaxation phase: IVR)、急速流入期(rapid filling phase: RF)、緩速流入期(slow filling phase: SF)、心房収縮期(atrial contraction phase: AC)に分けられる(Fig.4)。

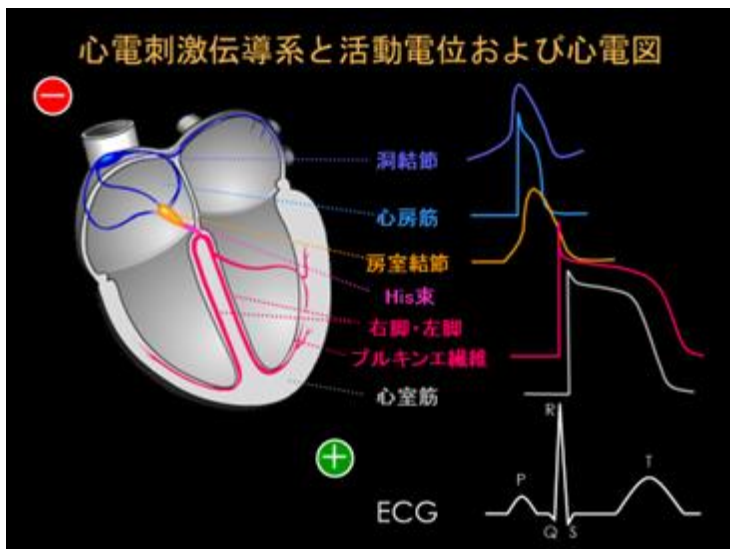


Fig.1 心電刺激伝導系と活動電位および心電図

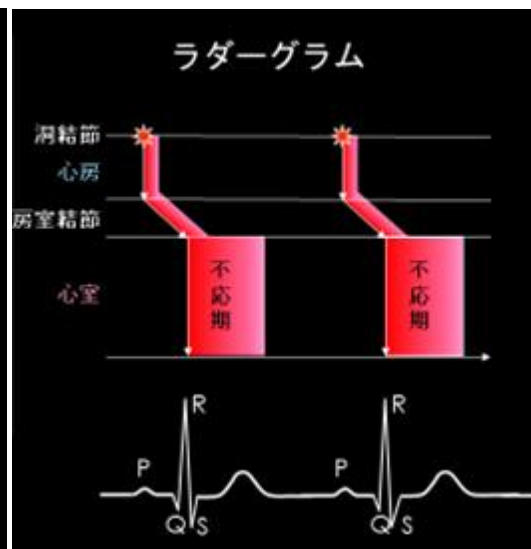


Fig.2 ラダーグラム

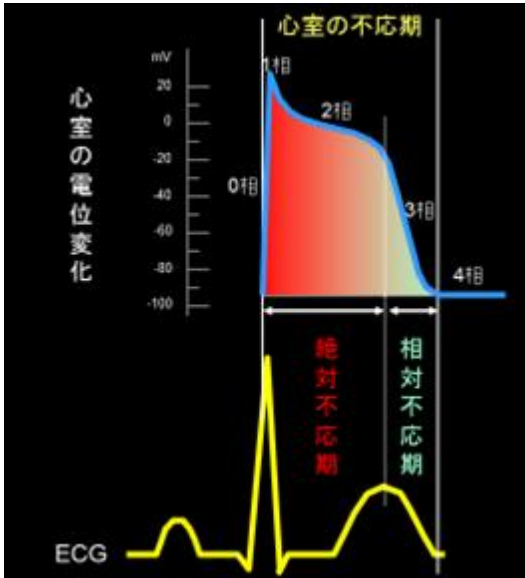


Fig.3 心室の電位変化

心房から心室に興奮が伝播すると心室は収縮を開始する。急速に左室圧は上昇し、心房圧を超えると開いていた僧帽弁は閉鎖する。さらに左室圧は上昇し大動脈圧を超えると大動脈弁が開放する。僧帽弁が閉鎖し大動脈弁が開放するまでの間、左室は密閉された(左室容積の変化がない)状態で心室筋が収縮し左室圧は急激に上昇する。

心臓CT撮影において特に重要な心周期は緩速流入期(slow filling phase: SF)と心房収縮期(atrial contraction phase: AC)である。

緩速流入期(slow filling phase: SF)では左房から左室への血液流入も緩やかになり、しばらく(心房収縮までの間)この状態が続き、左室容積はほとんど変化しない。心房収縮期(atrial contraction phase: AC)では洞結節の興奮が心房全体に伝播

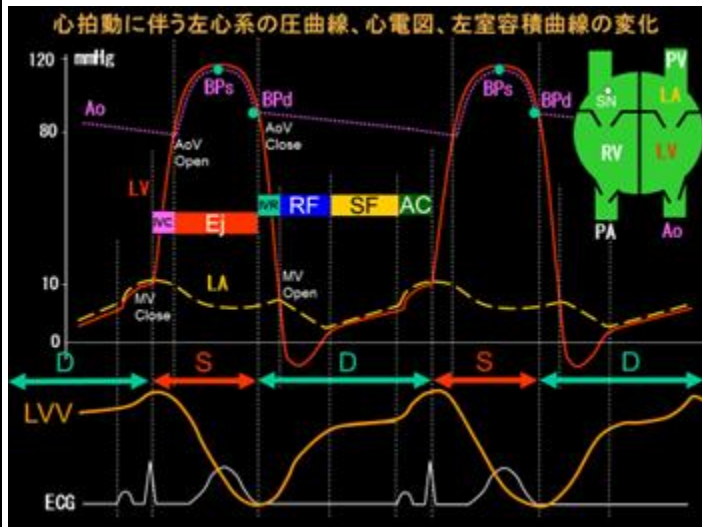


Fig.4 心拍動に伴う左心系の圧曲線、心電図、左室容積曲線の変化

し(P波)、心房収縮が起こる。これにより左房圧は上昇し左房内の血液は僧帽弁を押し広げて左室へ流入する。

冠動脈は心表面に存在し心室筋に枝を出しているため心筋に固定され、心臓の動きに伴って運動する。

したがって、左室容積の変化と冠動脈の動きはほぼ一致し、心房収縮期前で左室容積がほとんど変化しない緩速流入期は冠動脈の静止心位相として最も適している。

【心拍数と各心周期時間の関係 (Fig.5)】

心拍数 70/分以下の 364 例における 64 列 MDCT(ガントリ回転時間0.35 s)の位相検索用シネ画像を用いた検討では、収縮期 (S) , 急速流入

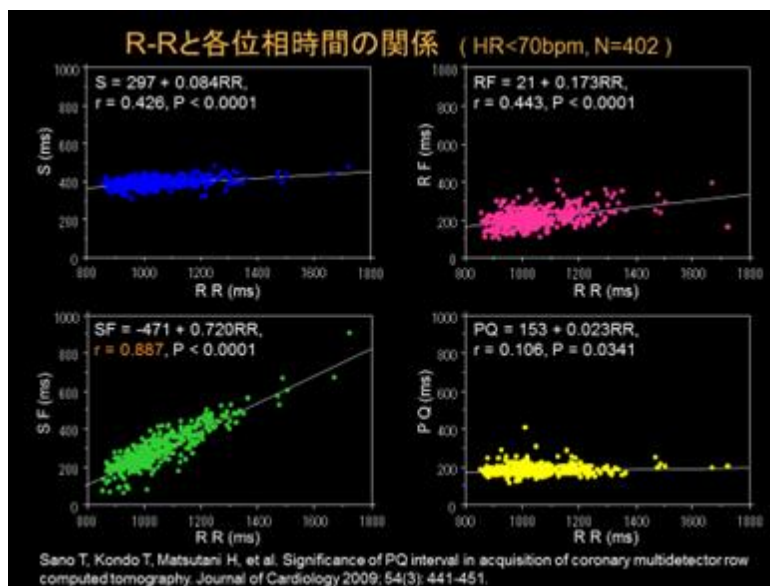


Fig.5 R-Rと各位相時間の関係 (HR<70 bpm,N=402)

Sano T, Kondo T, Matsutani H, et al. Significance of PQ interval in acquisition of coronary multidetector row computed tomography. Journal of Cardiology 2009; 54(3): 441-451.

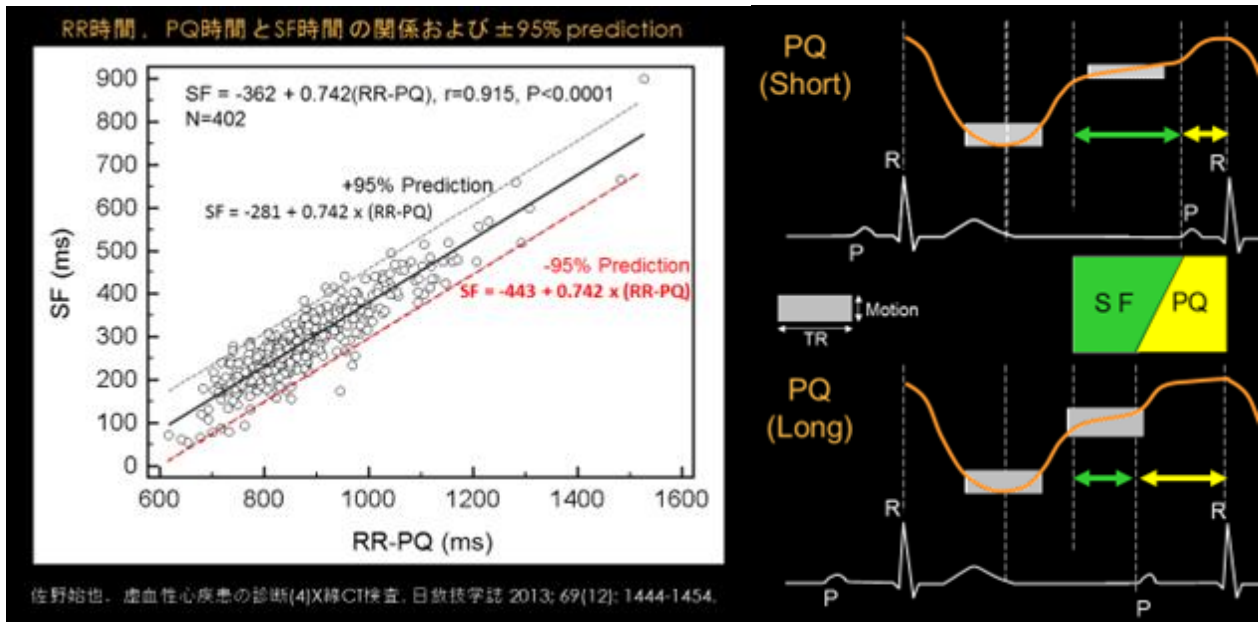


Fig.6 RR時間、PQ時間とSF時間の関係および±95%prediction 研究(3)

期 (RF), 緩速流入期 (SF), PQ時間はRR時間と有意な相関関係にあり, RR時間が長くなる(低心拍数)ほど長くなる. しかし, 収縮期 (S), 急速流入期 (RF), PQ時間は勾配が緩やかで, RR時間が伸びてもさほど長くならない. それらに比べ, 緩速流入期 (SF)は相関係数が最も高く, しかも勾配が急峻である. すなわち, 緩速流入期(SF)はRR時間(心拍数)の影響を最も強く受け, RR時間が延長するほど(低心拍数なほど), 緩速流入期が著明に延長する. したがって, 緩速流入期を長くするためには徐脈化が必要となる.

HR が低ければ拡張中期すなわち緩速流入期 (SF)が長くなり良好な画像が得られる. しかし, 上述したように拡張後期には心房収縮によるatrial kick が発生し, これに伴って冠動脈も動くので, 心房収縮を無視することはできない. 同じHR(同じRR

間隔)であってもPQ 時間が長くなればその分, 緩速流入期は短くなる. RR, SF, PQ の関係を検討した我々の研究(3)では $SF=-362+0.742(RR-PQ)$ …(式1) の関係を認めた. 破線は回帰直線± 2 SD で95% prediction の範囲を示し, 95% の確率で緩速流入期が175 ms 以上となるには(RR - PQ)が833ms 以上でなければならない. $PQ = 200$ ms なら $RR - 200 = 833$ で, $RR = 1033$ ms であり $HR = 58$ なら95% の確立でSF は175 ms 以上となる.

また, 拡張中期位相の中心はほぼRR の75% の位置に存在する4)ので曝射位相は75% RR に設定する. なお, 心房細動ではatrial kick がないため $PQ = 0$ ms であり, SF は次のR 波まで続くので, (RR - PQ)すなわちRR 間隔が833 ms 以上($HR: 72$ bpm 以下)であればSF は175 ms 以上となる (Fig.6,7).

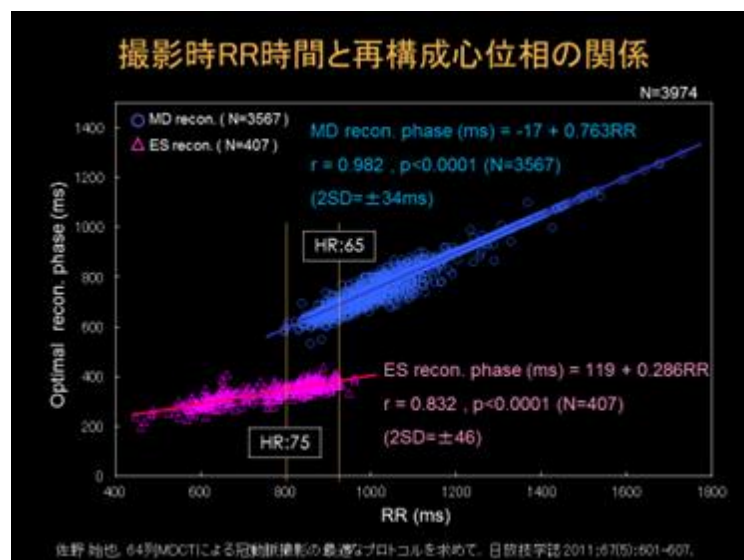


Fig.7 撮影時間RR時間と再構成心位相の関係

Table 1 不整脈の分類

不整脈の分類		
不整脈の分類	不整脈の発生源	病名
徐脈性不整脈	上室性	洞性徐脈 (HR \leq 50bpm Rubenstein分類)
		洞房ブロック・洞停止
		洞不全症候群 (SSS)
頻脈性不整脈	上室性	房室ブロック
		脚ブロック・心室内伝導障害
		洞性頻脈 (HR \geq 100bpm)
頻脈性不整脈	上室性	上室(心房)性期外収縮 (PAC)
		心房細動 (atrial fibrillation: Af)
		心房細動 (atrial flutter: AF)
		発作性上室性頻脈 (PAVT)
		心室性期外収縮 (PVC)
頻脈性不整脈	心室性	心室頻拍 (VT)
		心室細動 (VF)

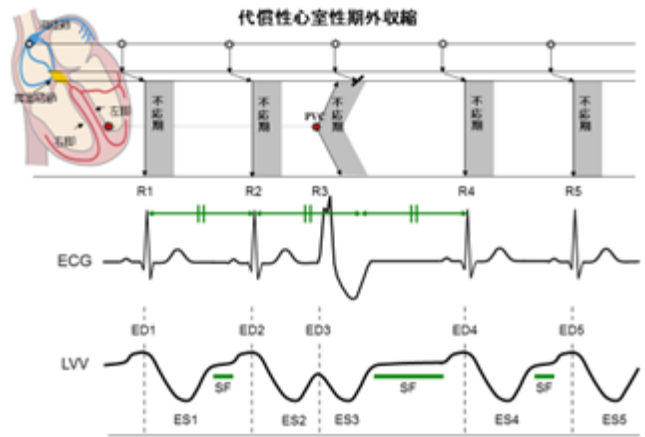


Fig.8 代償性心室性期外収縮

【不整脈の心電図と心臓動態】

不整脈は心臓の調律異常がみられる病態の総称ですが、大きくは徐脈性と頻脈性に分類できる (Table 1). 不整脈にはリズム不整を伴う不整脈(期外収縮, 心房細動, 洞性不整脈, 洞不全症候群, 2度および3度房室ブロックなど)ばかりでなく, リズム不整のない不整脈(1度房室ブロック(PQ>200 ms), 脚ブロック, 徐脈(心拍数<50 bpm), 頻脈(心拍数>100 bpm)など)がある. また, 不整脈の発生源によって上室性と心室性に分類する方法もある. 最も多い不整脈は期外収縮で予定より早期に出現する心拍である. 期外収縮は大きく上室性と心室性に分けられる. すべてをこの紙面で解説することは不可能なため, 代償性心室性期外収縮について説明する.

【代償性心室性期外収縮】

P波の先行しない幅の広いQRSが洞調律のRR間隔よりも早期に出現する. 心室性期外収縮 (premature ventricular contraction : PVC) の後に出る洞結節からの刺激(P波)は房室接合部あるいは心室の不応期によってブロックされるため, 心室まで伝導されず, 次の洞結節からの刺激(P波)が出るまでの間, 長い休止期(代償性休止期)を伴う. この心室性期外収縮を代償性心室性期外収縮と呼び, PVCの幅広いQRSを挟むRR間隔(R2-R4)は洞調律のRR間隔(R1-R2)の2倍となる.

洞調律(R1-R2)の心拍数が約65/分以下では拡張中期再構成の可能なSFが存在すると考えられる. 心室性期外収縮後のR3-R4には代償性休止期に伴う長いSFが存在するが, R2-R3では左心室が十分拡張していないうち(ED3)に心室性期外収縮に

よって収縮が始まるため, SFが存在しない. したがってR2-R3のデータを除外して画像再構成を行うことにより, 良好な拡張中期画像を得ることが可能である. 洞調律の心拍数によっては拡張中期再構成が困難な場合があり, 収縮末期再構成を行う場合には先行RRを考慮する必要がある. 収縮時間(RトリガからESまでの時間)は収縮を開始する時点の左室容積に依存し, 左室拡張末期容積は先行RR時間が短いほど小さくなる. 期外収縮が発生すると, 心室が十分拡張していないうち(ED3)に収縮が始まるため, 期外収縮(R3)から収縮末期(ES3)に至るまでの時間は洞調律後の収縮時間より短くなる. したがって, 心電図編集機能を使わずに期外収縮のES3を含んで収縮末期画像再構成を行うと, 良好な画像は得られない可能性がある. 可能であればR3-R4の収縮末期データ(ES3)を除外して画像再構成を行うと, 良好な収縮末期画像を得られる可能性が高くなる(Fig.8).

【終わりに】

本講演においては心臓CT撮影において重要な心電図と心臓動態についてお話した. CT装置が発展した現在においても被ばく低減と高画質を両立するための心拍数コントロールは重要である. 心臓CT撮影において, 心電図は撮影前に心臓の動きを推測する最も効果的な手段であり, 装置の性能や機能を最大限活用し最適化に努めていただきたい. そのためにも, 心電図と心臓動態, また不整脈についても熟知することが重要と考える.